

Не заменяя собой реального эксперимента, математический эксперимент позволяет эффективно определять изучаемые характеристики сложной системы на основе единства аналитических методов, метода статистического моделирования и уже проведенных экспериментов. Комплексное исследование сложных систем стало возможно лишь с помощью ЭВМ, путем соединения имитации и аналитического исследования математических моделей, т. е. с помощью проведения целенаправленных имитационных экспериментов.

Эмпирическое и теоретическое в рамках метода машинного моделирования оказываются равноценными партнерами при получении нового знания. Математический эксперимент, будучи промежуточным звеном между натурным экспериментом и теорией, обеспечивает более тесную органическую связь натурального эксперимента и теории, эмпирического и теоретического.

Возрастание абстрактности теоретических построений в современных науках диалектически дополняется поиском наглядных интерпретаций сложнейших теоретических конструкций. Своеобразная (знаковая) наглядность математической модели обеспечивается с помощью машинной графики как средства общения человека с ЭВМ.

Глава V

УКРУПНЕНИЕ КАК МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Современную ситуацию в науке в целом кроме всего прочего можно охарактеризовать как переход к изучению сложных систем. Обычно они составляют ядро теоретических построений, выступая в качестве фундаментальных объектов в физике, технике, биологии, экономике и других науках. В общей форме познание сложных систем содержит два этапа. Первым необходимым шагом изучения сложной системы является построение ее математической модели, вторым — анализ полученной модели. Поскольку концептуальных моделей исходного онтологического объекта (системы эмпирических свойств) может быть множество, постольку необходим и системный подход в исследовании объектов. Математическое моделирование и системный подход

являются своеобразным кредо современного исследования.

Надо сказать, что подобный характер познания сопровождается появлением ряда серьезных методологических проблем. Прежде всего это касается вопросов, возникающих после получения исходных математических моделей сложных систем на этапе изучения ее математиком, в самом начале пути «от абстрактного мышления к практике», которые, кстати, менее всего исследованы. В конечном счете они являются следствиями сложности математических моделей (не умаляя общности наших рассуждений, будем далее говорить лишь об одной сложной системе).

С математической точки зрения особую актуальность имеют два аспекта сложности моделей — большая (а часто бесконечная) размерность фазового пространства и его многоуровневая, иерархическая структура. Подобный характер математических моделей систем (даже исходя из того, что они вполне корректны) приводит к тому, что они часто оказываются практически необозримыми, а математические методы их анализа — недоступными в инженерной практике. Количество неизвестных параметров моделей оказывается настолько велико, что процесс анализа нельзя осуществить даже с помощью самых современных вычислительных машин. Вот почему одной из актуальнейших методологических задач ныне является преодоление подобно «тирании размерности». При этом парадокс состоит в том, что постоянное усложнение математических моделей систем требует все более активных усилий по их дальнейшему упрощению.

Именно в этом состоит суть идеи о сокращенном описании, сформулированной Н. Н. Боголюбовым. Она позволяет перейти от микро- к макроописанию в задачах статистической физики, осуществлять агрегирование в задачах математической экономики, разделять время при описании динамических систем (например, при расчетах энергетических сетей регионов, узлов АСУ, надежности вычислительных систем и пр.), использовать различные методы усреднения во множестве областей (от статистической физики до задач массового обслуживания)¹. В результате реализации указанных методов получены «упрощенные», «огрубленные», «идеализированные» и прочие модели, позволяющие, однако, эф-

фективно решать многие реальные задачи. Эти столь характерные и существенные для современного теоретического знания процедуры требуют, конечно, своего философского осмысления и обобщения.

В отмеченных методах, несмотря на различие названий и технического исполнения, имеются существенные общие черты. Общую специфику этих процедур лучше всего, на наш взгляд, выражает термин «укрупнение». Категории «огрубление», «идеализация», «упрощение» несут несколько иную нагрузку в методологии.

Основная идея укрупнения состоит в построении для заданной системы S такой укрупненной системы $\hat{S}$, которая, являясь более простой модификацией исходной, одновременно сохраняет ее основные черты. При этом наличие огромного числа возможных состояний системы используется в качестве положительного фактора, что позволяет существенно упростить ее анализ, подобно тому как это достигается в статистической физике путем усреднения. Заметим, что укрупнение — это отнюдь не объемное увеличение системы, а способ рассмотрения ее в более крупном плане, моделирование, так сказать, более крупноблочной модели. Особый методологический интерес в плане уяснения сущности укрупнения представляет так называемый «метод фазового укрупнения»². Дело в том, что в нем наиболее явно и полно воплощены характерные особенности теории укрупнения, что позволяет лучше уяснить методологию, благодаря которой порождаются и успешно распространяются различные модификации укрупнения.

В дальнейшем ставится задача вначале конкретно рассмотреть логико-методологические особенности и проблемы собственно метода укрупнения, затем дать общее понятие укрупнения и уяснить его философские основания, наконец, уяснить методологические следствия процедуры укрупнения.

1. ЛОГИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА

Говоря о сложной системе, математик прежде всего имеет в виду математическое представление о системе, характеризуемое: 1) фазовым пространством E , в достаточной степени адекватно описывающим возможные

состояния системы, причем «сложность» системы понимается как большая размерность и (или) структурная сложность этого пространства; 2) правилом, законом (точнее, оператором), описывающим эволюцию рассматриваемой системы как определенное «движение» в фазовом пространстве E .

В общем математик имеет дело с абстрактным образом (моделью) сложной системы, определяемой оператором S , действующим в некотором банаховом пространстве. В качестве простого примера абстрактной модели можно указать матрицу $S = \{S_{ij}, 1 \leq i \leq j \leq N\}$, определяющую линейный оператор в N -мерном евклидовом пространстве. Сложность системы характеризуется размерностью банахова пространства, в котором задан оператор S , определяющий систему. Процедура укрупнения с математической стороны осуществляется следующим образом.

Для заданной исходной системы S выбирается близкая ей базисная система S_0 ; опираясь на S и S_0 , строится согласно определенному алгоритму укрупненная система $\hat{S}$.

Исходное предположение о характере реальной системы состоит в том, что оператор S обратим, т. е. существует обратный оператор S^{-1} , который однозначно определяет искомые характеристики реальной системы. Например, матрица S^{-1} однозначно определяет решение системы линейных уравнений $Sx = a$ в виде $x = S^{-1}a$, где a — заданный вектор. Абстрактная модель базисной системы определяется линейным оператором S_0 на спектре; существуют нули оператора S_0 , т. е. такие x , для которых $S_0x = 0$. Совокупность нулей оператора S_0 обозначим $N(S_0) = \{x : S_0x = 0\}$. Для базисной системы S_0 размерность подпространства нулей $N(S_0)$ отлична от нуля: $\dim N(S_0) \neq 0$. При таком условии оператор S_0 необратим.

Основное предположение о близости исходной системы S к базисной системе S_0 на математическом языке означает, что исходная система S_e зависит от некоторого параметра e таким образом, что при $e \rightarrow 0$ исходная система переходит в базисную: $\lim_{e \rightarrow 0} S_e = S_0$.

Укрупнение исходной системы основано на обращении оператора, возмущенного на спектре³. Процесс укрупнения осуществляется на основании следующего

предельного соотношения: $\lim_{e \rightarrow 0} \hat{C}_e \hat{S}_e^{-1} = \hat{S}^{-1}$. В этом соотношении числовой параметр C_e удовлетворяет условию $\lim_{e \rightarrow 0} C_e = 0$. Необходимость в нормирующем параметре C_e очевидна. Поскольку оператор S_e сводится к необратимому оператору S_0 при $e \rightarrow 0$, то его обратный оператор S_e^{-1} не может иметь конечный предел без соответствующей нормировки. Рассматривая нормированное сужение оператора $C_e \hat{S}_e^{-1}$ на факторизационном подпространстве V , размерность которого совпадает с размерностью $N(S_0)$: $\dim V = \dim N(S_0)$, в пределе получим оператор $\hat{S}^{-1}$, обратный которому $\hat{S}$ в пространстве V определяет укрупненную систему $\hat{S}$.

Для простоты мы вначале представили случай стационарной модели системы. Однако возможно также укрупнение нестационарных (эволюционирующих во времени) моделей. Например, в современной теории надежности сложных систем для описания функционирования систем используются случайные процессы $S_{(t)}$ в некотором фазовом пространстве E . Надежность системы обеспечивается надежностью составляющих ее элементов, а также наличием резервных элементов и контролем за состоянием системы. На практике существующие сложные системы высоконадежны, что означает малую вероятность выхода системы из строя в процессе функционирования. Базисная система абсолютно надежна, ее функционирование описывается случайным процессом $S_0(t)$ в расщепленном фазовом пространстве $E = \{E_u, u \in V\}$ с изолированными классами состояний $E_u, u \in V$. Физическая интерпретация близости $S_{(t)}$ к $S_0(t)$ состоит в том, что исходная система $S(t)$ в основном функционирует по состояниям какого-либо класса E_u и лишь изредка с малой вероятностью переходит из одного класса (E_u) в другой класс E_v .

Метод укрупнения обладает целым рядом особенностей, представляющих специально методологический и философский интерес. Основанием метода укрупнения, как упоминалось, служит операция предельного перехода; вместе с тем укрупненная система $\hat{S}$ строится для данной сложной системы S при выбранной базисной системе S_0 без операции предельного перехода.

Разумеется, при этом укрупненная система $\hat{S}$ лишь

приближенно описывает исходную систему. Это приближение тем лучше, чем ближе исходная система к базисной. Примечательная особенность метода укрупнения систем состоит в том, что процесс построения укрупненной системы алгоритмизируется. Иначе говоря, для данной исходной системы S и выбранной базисной системы S_0 можно указать алгоритм построения укрупненной системы $\hat{S}^4$.

При построении укрупненной системы $\hat{S}$ для данной исходной системы S имеет место свобода выбора базисной системы S_0 , что является несомненным достоинством метода укрупнения при исследовании конкретных систем. Оптимальный выбор базисной системы для данной исходной системы представляет собой инженерную задачу. Впрочем, возможна и математическая постановка задачи оптимальности алгоритмов укрупнения. Во всяком случае процесс построения укрупненной системы однозначно определен при заданных S и S_0 . Обоснованием однозначности алгоритма укрупнения служит единственность результата в операции предельного перехода. Однако данной укрупненной системе $\hat{S}$ может соответствовать несколько различных исходных систем $S^{(i)}$.

Важной особенностью метода укрупнения систем является возможность иерархии укрупнения: к укрупненной системе $\hat{S}$ можно в свою очередь применить алгоритм укрупнения, построив новую укрупненную систему $\hat{\hat{S}}$, и т. д. Кроме того, алгоритм укрупнения можно применить к подсистемам S_u , $u \in V$, на которые расщепляется базовая система S_0 . Таким же образом может быть построена иерархия укрупненных систем, более или менее детально описывающих исходную систему.

Методологический интерес представляет следующая особенность метода укрупнения: укрупненная система $\hat{S}$ обладает новыми качественными свойствами, которые, вообще говоря, отсутствуют у исходной системы S (вот почему здесь не подходят термины «огрубление», «упрощение» и т. п.). Например, укрупнение полумарковских процессов приводит к марковским процессам. Марковское свойство укрупненного процесса проявляется в результате укрупнения (усреднения) в условиях эргодичности базовой системы. Отметим, что процесс укрупнения осуществляется в результате двойного отри-

цания: укрупненный оператор $\hat{S}$ является обратным к предельному для оператора, обратного к исходному оператору S . Наличие новых качественных свойств укрупненной системы является хорошей иллюстрацией диалектического закона отрицания отрицания.

Особый интерес представляет следующий феномен. При укрупнении системы S обычно избираются (постулируется знание) те ее локальные характеристики, которые удобны для нашей математической модели. Но этот же метод можно ориентировать и на другие локальные характеристики системы. Так, изучая надежность сложных систем, математик, укрупняя, берет в качестве основных локальных характеристик системы надежность характеристики составляющих ее элементов, а инженера может интересовать нечто другое. Однако математическую модель системы можно семантически наполнить так, чтобы она соответствовала и другим характеристикам. Кстати, вся история построения математических моделей систем служит тому подтверждением. Назовем этот феномен семантическим постулатом метода укрупнения (недаром иногда говорят, что модель «умнее своего автора»).

Почти относительно каждого из отмеченных свойств укрупнения возникает естественный вопрос: «Почему?» Многие из них математик обходит или решает интуитивно. В определенной степени этот «утилитаризм» оправдан. Решение подобных проблем является прямой обязанностью методолога науки. Наиболее общие вопросы типа: почему укрупнение возможно; почему оно столь эффективно; почему оно имеет такую широкую сферу применения — непосредственно касаются компетенции методологов науки. Но прежде чем переходить к философскому анализу особенностей метода укрупнения, нужно определить место последнего в ряду других соприкасающихся методов изучения сложных систем, границы его применимости и перспективы дальнейшей разработки.

2. МЕТОД УКРУПНЕНИЯ И ДРУГИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

На языке моделей смысл укрупнения состоит в переходе от одной математической модели к другой, более простой в нее вложенной и наследующей ее характер-

ные или важные в данном контексте характеристики и свойства. Подобный подход имеет прочную естественнонаучную основу и традицию.

В современной статистической механике и физике широко распространена принадлежащая Н. Н. Боголюбову идея сокращенного описания неравновесных состояний макроскопических систем⁵, смысл которой состоит в том, что в ходе эволюции физических систем, обладающих большим числом степеней свободы (большая и даже чрезвычайно большая размерность фазового пространства); естественно возникает состояние системы, которое может быть описано в терминах макроскопических (укрупненных) характеристик (см. в приводимых ниже примерах переход от кинетических уравнений к макроскопическим уравнениям гидродинамики).

Идея сокращенного описания получила важное (и весьма близкое к той математической модели укрупнения, о которой мы говорили) развитие в статистической механике в работах брюссельской школы⁶. Такую же методологическую нагрузку несут используемые в теории нелинейных колебаний методы усреднения⁷, метод агрегирования в математической экономике⁸, методы анализа сложных технических систем⁹, диакоптика Г. Крона¹⁰ и др.

Итак, имеется общая идея укрупнения и ее реализация разными методами. Для иллюстрации эффективности этой идеи приведем ряд примеров, в которых в том или ином смысле она реализована. При этом будем различать реальные системы S_p , исходные модели реальных систем S , укрупненные модели системы $\hat{S}$ и вторично укрупненные модели систем $\hat{\hat{S}}$ (здесь мы опускаем соответствующие математические выражения).

Пример 1. Известно, что микродвижения разреженного газа (S_p) описываются кинетическим уравнением Л. Больцмана (S). Когда же переходят к макроописанию в терминах гидродинамических величин, то получают уравнения гидродинамики Эйлера и Навье — Стокса. Это и есть укрупненная система $\hat{S}$.

Пример 2. S_p : движение частицы в вязкой жидкости; S : уравнения Ланжевена.

Метод перехода — усреднение в пространстве скоростей по распределению Максвелла.

$\hat{S}$: уравнение броуновского движения в пространстве координат.

Пример 3. S_p : движение релятивистской квантовой частицы массы со спином $1/2$; S : релятивистское уравнение П. Дирака; $\hat{S}$ — уравнение Паули — Шредингера для частицы и античастицы; $\hat{\hat{S}}$ — уравнение движения частицы в классической механике (уравнение Гамильтона). Переход осуществляется по константе Планка $\hbar$.

Пример 4. S_p : высоконадежные сложные системы; S : уравнения (многомерные и бесконечномерные) марковского восстановления.

Метод перехода — укрупнение состояний.

$\hat{S}$: укрупненные марковские модели; $\hat{\hat{S}}$: последующее укрупнение марковских моделей.

Пример 5. S_p : динамические модели экономики; S : алгебраические и дифференциальные уравнения линейных моделей математической экономики.

Метод перехода — агрегирование моделей (методы диакоптики, методы агрегирования).

$\hat{S}$: агрегированные модели математической экономики.

Пример 6. S_p : динамические системы с быстрым и медленным временем; S : системы дифференциальных уравнений с малым параметром при части производных (тихоновские системы).

Метод перехода — усреднение по траекториям динамических систем в «быстром» времени.

$\hat{S}$: усредненные дифференциальные уравнения для динамических систем с «медленным» временем.

Пример 7. S_p : стохастические системы марковского типа с разделенным временем; S : марковские и полумарковские случайные процессы.

Метод перехода — укрупнение состояний случайных процессов; $\hat{S}$: укрупненные марковские и полумарковские процессы; $\hat{\hat{S}}$: последующее укрупнение марковских и полумарковских процессов.

Приведенный перечень естественнонаучных задач, в исследовании которых на определенных этапах оказывалась доминирующей идея перехода к значительно более простой, но тем не менее (информационно) близкой модели, показывает, что укрупнение охватывает важнейшую часть естественнонаучного познания. Учи-

тывая, что собственно в методе укрупнения идея укрупнения выражается наиболее полно, обратимся к его методологическому анализу. Причем особо следует остановиться на вопросе его применимости и перспективах.

Границы применимости метода укрупнения связаны прежде всего с его обоснованием в абстрактной математической модели. Чем шире класс операторов S , для которых выполнима приведенная операция предельного перехода, тем разнообразнее множества математических моделей, в которых применим метод укрупнения, а значит, и шире возможности использования метода укрупнения применительно к конкретным сложным системам.

Практическое применение метода укрупнения не связано с ограничениями абстрактной математической модели, однако оно существенно зависит от возможностей конкретной интерпретации базисной системы и ее описания оператором на спектре. Пока имеется лишь четкая интерпретация понятия базисной системы в теории надежности, статистической механике, математической экономике и некоторых других науках. Например, в теории надежности базисная система абсолютно надежна; абсолютно надежная система описывается эргодическим процессом, производящий оператор которой находится на спектре.

Метод укрупнения сложных систем несомненно перспективен в преодолении «тирании размерности». Он основан на естественной эвристической идее расщепления и склеивания (укрупнения) подсистем. Метод укрупнения опирается на строгие математические теоремы об обращении сингулярно возмущенных операторов. Результаты применения метода укрупнения имеют реальную инженерную интерпретацию. Алгоритмы укрупнения доступны для практической реализации. Чтобы применить метод укрупнения к конкретной системе, нужно найти близкую к ней базисную систему, и тогда алгоритм укрупнения упростит анализ системы.

3. ФИЛОСОФСКИЕ ОСНОВАНИЯ И ОБЩАЯ ДЕФИНИЦИЯ УКРУПНЕНИЯ

Рассмотрим теперь вопрос о философских основаниях метода укрупнения. Каковы причины его возможности, эффективности и широты применения? С этой целью

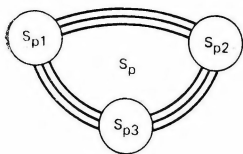


Рис. 1. Исходная система

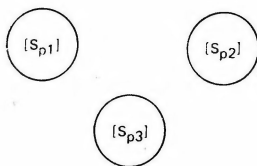


Рис. 2. Базисная система

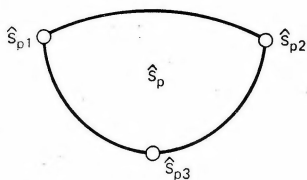


Рис. 3. Укрупненная система

требуется дать соответственно и более широкую дефиницию укрупнения, чтобы корректно оперировать ею в системе более общих категорий логико-методологического уровня. При этом необходимо абстрагироваться от некоторых сугубо математических особенностей укрупнения и одновременно осуществить спецификацию соответствующих общеполитических категорий. Это возможно только вместе с уяснением философских оснований метода укрупнения. Мы будем различать онтологические, гносеологические и методологические основания.

Итак, обращение к онтологии требует некоторого расширения терминологии. Кроме абстрактных математических систем мы будем также различать соответствующие им реальные системы S_p (система молекул, космическая станция, экономический регион, живой организм и т. п.), их реальные части S_{pi} , реальное укрупнение $\hat{S}_p$, а также базисные реальные системы.

Эвристика математической модели укрупнения отталкивается от следующей схемы представления реальности (см. рис. 1, 2, 3). Исходная система S_p (рис. 1) расщепляется на совокупность не связанных подсистем $S_p = \{S_{pi}, i \in V\}$, где V — некоторое параметрическое множество (рис. 2). Каждая из подсистем S_{pi} укрупняется: заменяется одним элементом $\hat{S}_{pi}$, причем укрупняются также и связи. В результате укрупненная система

определяется совокупностью укрупненных элементов $\hat{S}_{pi}$, $u \in V$ и укрупненными связями между ними: $\hat{S}_p = \{S_{up}, u \in V\}$ (рис. 3).

Обратим внимание на то, что укрупненная реальная система $\hat{S}_p$, вообще говоря, существенно проще исходной реальной системы, так как совокупность элементов исходной системы, входящих в подсистему S_{pi} вместе со своими связями, соответствует одному элементу $\hat{S}_{pi}$ укрупненной системы $\hat{S}_p$.

Принципиальным моментом схемы укрупнения является введение базисной системы S_{po} , состоящей из изолированных элементов данного расщепления (см. рис. 2): $S_{po} = \{[S_{pi}], u \in V\}$.

Предполагается, что, чем ближе реальная система S_p к базисной системе автономных элементов, тем точнее укрупненная система $\hat{S}_p$ описывает ее. Иначе говоря, связи между подсистемами $\hat{S}_{pi}$ должны быть слабыми, а целостность элементов — сильной. Конечно, при укрупнении нельзя совсем игнорировать связи, ибо получится тривиальный результат: совокупность изолированных укрупненных элементов.

Таким образом, при построении укрупненной системы учитываются реальные элементы системы и характер их связи; степень близости реальной системы к системе, состоящей из слабосвязанных бесструктурных элементов. Теперь становится очевидным, что процесс укрупнения имеет явные черты, отраженные в категории огрубления (действительности). Но категории огрубления недостаточно, чтобы описать его специфику, прежде всего потому, что при укрупнении обнаруживаются качественно новые свойства. Так, полумарковская модель при укрупнении обнаруживает марковские свойства. В укрупнении также имеют место элементы абстракции и идеализации. Абстрагируются от внутренней структуры элементов системы и ряд их связей; идеализируется автономность элементов и их отдельные связи. Главнейшее онтологическое основание укрупнения в том и состоит, что реальные системы в том или другом отношении состоят из сравнительно независимых целостных, а иногда и внутренне однородных подсистем, уровней организации и т. п. Отсюда — возможность абстрагироваться от внутренней структуры подсистем и их некоторых, несущественных в данном отношении,

связей и одновременно идеализировать независимость элементов и значение некоторых отдельных связей.

Философский анализ требует более общего понятия укрупнения. Категорию укрупнения целесообразно понимать как такое преобразование (с определенными оговорками — огрубление) сложной системы, при которой она рассматривается как более простая система: ее части (составляющие подсистемы, группы элементов, фазы и т. п.) рассматриваются как бесструктурные целостные элементы с ограниченными количественно и слабыми внешними связями. Это образ системы как совокупности сравнительно автономных и внутренне однородных элементов. Важно, что подобное расширенное толкование укрупнения позволяет также использовать термин «разукрупнение» для обозначения процессов, противоположных укрупнению.

Согласно диалектико-материалистической гносеологии, познающему субъекту в общем противостоит бесконечно сложный, неисчерпаемый и разнообразнейший мир. Этот мир требуется отразить в познании, преобразовать его в систему знаний. Но разум человека актуально (но не потенциально) ограничен. Следовательно, в познании решается принципиальная задача отражения (ассимиляции) бесконечного, неисчерпаемого и т. п. мира в актуально конечной, исчерпаемой и т. д. познавательной системе. Эта задача решается в каждый данный момент путем представления сложного и многообразного посредством более простого и однообразного. Субъект приводит, так сказать, своеобразную прагматическую проекцию объекта в область человеческой деятельности. Все это относится и к гносеологическим основаниям процесса укрупнения. Эффективность и специфика его зиждутся на реальном наличии во взаимосвязанном и едином мире относительно независимых и однородных частей, аспектов, уровней организаций и т. п., которые в определенной степени справедливо рассматривать изолированно, как познавательные объекты.

Процесс познания объектов действительности многоступенчатый, и математическая задача укрупнения встает не сразу. Вначале из объективной реальности выделяется ее эмпирический фрагмент S_p (в самом широком смысле здесь тоже имеет место укрупнение). Затем строят ее начальную математическую модель S_n .

Представленный здесь метод укрупнения является не менее чем 3-м шагом абстрагирования реальности. Здесь появляются специфические посредники в виде базисной системы S_0 , преобразующей исходную систему S в удобный для построения укрупненной системы вид $\hat{S}$. Изобразим сказанное схематической цепочкой (здесь $\hat{\longrightarrow}$ означает процедуру укрупнения):

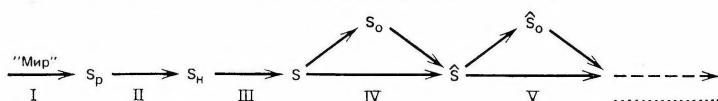


Рис. 4. "Цепь" укрупнения

Перейдем к уяснению методологического значения метода. Каковы его методологические оправдания (основания)? Что нового он привносит в методологию науки? Главное методологическое основание и значение метода состоят, конечно, в том, что укрупнение системы позволяет кратчайшим путем получить существенную часть информации о сложной системе. Технические трудности получения информации о сложной системе (при «разукрупнении» — шаг III) возрастают настолько, что неизбежно возникает необходимость укрупнения системы. При этом разумеется, что потери информации невелики по сравнению с простотой получения существенной информации о тех аспектах системы, которые рассматриваются*.

Методологическое значение укрупнения проявляется также в его богатых следствиях общего порядка. Прежде всего категория укрупнения дает возможность рассмотреть историю научного познания (в частности, прогресса физической науки) как процесс последовательного разукрупнения знания. Например, классическая механика ($S_{кл.}$) является укрупненным вариантом квантовой механики ($S_{кв.}$), а последнюю можно в свою очередь представить как укрупнение релятивистской квантовой механики ($S_{р.кв.}$). В итоге получается система вложенных друг в друга теорий: $S_{кл.} \subset S_{кв.} \subset S_{р.кв.}$.

Здесь каждая из предшествующих теорий является укрупнением последующих. И наоборот, каждая из по-

* Есть основания для предположения, что технические трудности получения информации при разукрупнении возрастают пропорционально степени усложнения системы, а увеличение информации пропорционально лишь логарифму усложнения.

следующих теорий является разукрупнением (революционным!) предыдущей. Такова общая закономерность. Так, эволюция познания любого научного объекта в значительной мере представляет собой историю его разукрупнения.

Достаточно сопоставить приведенные выше примеры с историей науки, и мы увидим множество разукрупнений, составляющих своеобразные научные революции. Таким образом, укрупнению сложной системы, как правило, предшествует процесс ее разукрупнения. В широком смысле даже случай перехода от простой системы к сложной в эксперименте или инженерной практике является своего рода разукрупнением — эмпирическим разукрупнением. Последующее построение начальной математической модели сложной системы также есть своеобразное разукрупнение. Ведь в теоретической модели присутствуют вещи, которые не наблюдаются в предшествующем эксперименте. Если эта теоретическая модель или какая-либо из ее последующих обобщений (разукрупнений!) оказывается теоретически неконструктивной, т. е. слишком сложной для извлечения информации, то встает вопрос о ее укрупнении и, возможно, повторном укрупнении. Так что «цепь» укрупнения, точнее, ее правая часть исторически реализуется наоборот — справа налево (см. рис. 4).

Укрупнение в качестве метода является как бы моментальным обратным снимком исторического процесса познания*. Это представляет, конечно, новый момент единства исторического и логического. Подобное возможно в связи с жесткой кумулятивной структурой математизированного знания, в котором последующие модели теории охватывают предыдущие по определенным требованиям-правилам. Эти требования в физике формулируются в виде знаменитого «принципа соответствия» Н. Бора. Кратко его смысл состоит в том, что всякая обобщающая теория, ее фундаментальные уравнения при определенном граничном переходе должны переходить в свою предшественницу. Например, уравнения специальной теории относительности переходят в уравнения классической механики, если параметр C

* В результате укрупнения S получается система, несколько отличная от первоначально разукрупненной: $\hat{S}$ не обязательно совпадает с S_H (см. рис. 2). Диалектическая тонкость состоит в том, что полной симметрии укрупнения-разукрупнения нет.

(максимальная скорость передачи взаимодействия) устремить к бесконечности.

Но этот же процесс почти всегда можно рассматривать как укрупнение. Процедура укрупнения в отличие от «принципа соответствия» затрагивает более глубокие структуры; она внутренне обоснованнее и действует далее, так как ее можно повторять по некоторому алгоритму. Следовательно, можно говорить о принципе укрупнения как такой модификации «принципа соответствия», при которой раскрывается механизм последнего. Если укрупнение является как бы историческим движением вспять, но ведущим не всегда к уже известному, то оно может служить также методом исторических исследований науки, тем более что возможна иерархия укрупнений.

Следующий важный урок методологии укрупнения можно сформулировать таким образом: эволюция науки — вещь неоднозначная; она могла и может проходить несколькими различными путями*. Качественно это вытекает из того, что при укрупнении пренебрегают определенными свойствами и связями и в придачу получают новые особенности, а потому укрупненная система произвольна (при всей однозначности ее получения посредством предельного перехода!). Формально это видно из того, что одна и та же укрупненная система может быть получена из различных исходных. Например, в одной из них элементы могут быть разделены на две части, в другой — «вырван» кусок и т. д. Следовательно, при обратном разукрупнении могут получаться различные модели фрагмента реальности, который изучается. Это свидетельствует о неиспользованных возможностях в истории науки (в частности, физики), которые можно реализовать задним числом.

Здесь имеются в виду варианты теорий, моделей, систем и т. п. Так, разукрупнение уравнения гидродинамики (Навье — Стокса) может приводить к различным уравнениям кинетики газов (например, кинетическому уравнению Больцмана, к цепочке уравнений

* Подобная мысль следует из более общих соображений. Относительно становления научных понятий она проведена в работе: Кривенко Д. Т. Становлення вихідних кількісних понять у фізиці. К., 1979. Конечно, реальных и продуктивных путей — ограниченное количество; в качестве ограничительного фактора выступают, в частности, конкретно-исторические условия.

ББГКИ и их вариантам). Вместе с тем оно может привести и к чему-то новому. В то же время возможность повторного применения алгоритма укрупнения тоже может привести к открытиям еще не реализованных возможностей, к семантически не осмысленным моделям. Так, укрупнение уравнения гидродинамики ведет к новому уравнению, которое пока физически не наполнено. Корень неоднозначности находится, по всей видимости, в том, что уже на этапе получения исходной системы S проводится в принципе неоднозначное огрубление реальной системы S_p^* .

В связи с эффективностью и широтой применения идеи укрупнения в прикладных исследованиях методология укрупнения составляет важный момент методологии математизации вообще. Она дает стратегию приложения математики в тех областях, где имеют дело со сложными системами. Укрупнение весьма действенный способ математизации. Оно, как следует из нашего анализа, возможно потому, что объективно, при всеобщей связи мира, имеет место также и относительная автономность его элементов в том или ином аспекте; оно так широко применимо, ибо эргодические и близкие к ним системы составляют весьма широкий класс среди других сложных систем; оно так эффективно, ибо благодаря ему сравнительно легко получить существенную информацию о сложной системе.

Рассмотренные философские аспекты и методологические следствия укрупнения являются в значительной мере основанием и уроками математизации вообще. Математизация должна максимально опираться на свойства реальных систем, на образцы манипуляций с ними, а не навязывать во что бы то ни стало реальности удобную математическую схему; ставить целью добытие существенной информации, а не обязательно всей информации; базироваться на тех системах среди класса математизируемых, математические модели которых самые простые и точные. Ради этого жертвуют точностью и полнотой, которую нельзя практически реализовать. Когда этого нет, нет и математизации, а есть

* Напомним, что укрупнение далеко не произвольный процесс. Во-первых, свобода выбора S_0 эмпирически ограничена тем, что целесообразны только те базисные системы, которые соответствуют объективной автономности подсистем. Во-вторых, однозначен предельный переход от S и S_0 к $\hat{S}$.

лишь своеобразная математическая схоластика. Сила математизации в случае укрупнения особенно ярко проявляется в семантическом постулате: ориентируясь при построении модели на одни характеристики, в итоге получают информацию также и о других характеристиках.

Итак, метод укрупнения дает богатую пищу для философских рефлексий. Встает общая проблема: какое место занимают категории укрупнения-разукрупнения в системе таких категорий, как «огрубление», «отражение», «абстракция», «идеализация», «исчерпаемость» и т. п.? Понятно, что каждый новый член системы категорий ставит новые проблемы коррекции всей системы, ее внутренней гармонизации и развития. Но эти вопросы пока что выходят за рамки нашего непосредственного интереса.

Глава VI

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЗНАНИЯ В ОПЫТНЫХ НАУКАХ

В настоящее время системный характер теоретического знания представляет собой довольно слабо исследованную область. Это относится и к его составу, и к структуре, и к функциям. Например, если иметь в виду последний из аспектов анализа, то можно отметить, что многие специалисты выделяют различные функции его теории. Так, А. И. Ракитов к их числу относит эвристическую, эпистемологическую и «генетическую» функции¹; А. А. Печенкин — описательную, объяснительную и предсказательную²; Г. И. Рузавин — информационную, систематизирующую, прогностическую и объяснительную³; Л. Б. Баженов — описательную, объяснительную, предсказательную и синтезирующую⁴; И. Д. Андреев — объяснительную, предсказательную, синтезирующую, практическую и методологическую⁵; В. Г. Афанасьев — информационную, объяснительную, эвристическую, практическую и прогностическую⁶ и т. д.

Существование подобного многообразия взглядов связано с тем, что авторы по-разному понимают системный характер научного знания, включая теорию, а также системность процесса научного познания в целом.